

Niveles de metales (Al, Cr, V, As, Se) en partículas PM₁₀ en la atmósfera de la localidad de Barrancas, Norte de Colombia.

Levels of metals (Al, Cr, V, As, Se) in PM₁₀ particles in the atmosphere of the town of Barrancas, North Colombia.

Carlos Doria Argumedo¹

¹Universidad de La Guajira. Facultad de Ingeniería. Colombia

Recibido: 14 de noviembre de 2019.

Aprobado: 15 de diciembre de 2019.

Resumen — Teniendo en cuenta los distintos estudios sobre los niveles de contaminación generados por las partículas que hacen mención de los peligros para la salud humana asociados con el incremento en la inhalación de la masa de partículas PM₁₀ y su composición metálica, se determinaron los niveles de: Al, Cr, V, As, Se; generados por la re-suspensión del suelo, como fuente natural; y las actividades mineras de carbón y la circulación vehicular, como las fuentes antropogénicas de mayor relevancia, en la localidad de Barrancas, La Guajira, Colombia. El programa de monitoreo contempló la definición de tres sitios ubicados estratégicamente, teniendo en cuenta las actividades mineras de extracción de carbón, así como agrícolas y pecuarias; durante las temporadas de sequía y de lluvia. Se utilizaron filtros de cuarzo para la recolección de las partículas PM₁₀, por medio de muestreadores de alto volumen Hi-Vol, en un período de 10 meses para un total de 30 muestras. Los filtros fueron sometidos a un proceso de digestión ácida para la extracción de los metales, los cuales fueron analizados por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). La concentración de partículas PM₁₀ superó el estándar anual de 20 µg/m³ establecido por la OMS. Las partículas PM₁₀ están constituidas principalmente de Al (1,17 µg/m³ ± 0,14) y Fe (0,53 µg/m³ ± 0,30). El análisis estadístico permitió determinar que, entre los sitios de muestreo, no se presentan diferencias significativas. Los niveles de V no supera el estándar de calidad del aire señalado para Colombia; pero los niveles de As sobrepasan levemente el límite permisible de la OMS. Adicionalmente, el análisis estadístico permitió concluir que en la zona existe una sola fuente de origen, natural o antropogénica, como responsable de la presencia de los metales en el material particulado.

Palabras clave: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente, metales, minería de carbón, partículas inhalables PM₁₀.

Abstract — Taking into account the different studies on the levels of contamination generated by the particles that mention the dangers to human health associated with the increased inhalation of the mass of PM₁₀ particles and their metallic composition, the levels of: Al, Cr, V, As, Se; generated by the re-suspension of the soil, as a natural source; and coal mining activities and vehicular traffic, such as the most important anthropogenic sources, in the town of Barrancas, La Guajira, Colombia. The monitoring program contemplated the definition of three strategically located sites, taking into account the mining activities of coal extraction, as well as agriculture and livestock; During the dry and rainy seasons. Quartz filters were used to collect the PM₁₀ particles, by means of Hi-Vol high volume samplers, in a period of 10 months for a total of 30 samples. The filters were subjected to an acid digestion process to extract the metals, which were analyzed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The concentration of PM₁₀ particles exceeded the annual standard of 20 µg / m³ established by the WHO. The PM₁₀ particles are mainly made up of Al (1.17 µg / m³ ± 0.14) and Fe (0.53 µg / m³ ± 0.30). The statistical analysis allowed determining that, between the sampling sites, there were no significant differences. V levels do not exceed the air quality standard established for Colombia; but As levels slightly exceed the WHO allowable limit. Additionally, the statistical analysis allowed concluding that in the area there is only one source of origin, natural or anthropogenic, responsible for the presence of metals in the particulate material.

Key words: Mass Spectrometry with Inductively Coupled Plasma, metals, coal mining, PM₁₀ inhalable Particle.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: cdoria@uniguajira.edu.co (Carlos Doria Argumedo)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>).

Forma de citar: C. Doria Argumedo, "Niveles de metales (Al, Cr, V, As, Se) en partículas PM₁₀ en la atmósfera de la localidad de Barrancas, Norte de Colombia", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 8, no. 1, pp. 116-123, 2020

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la contaminación atmosférica por material particulado se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales [1], la cual tiene su origen desde el punto de vista natural o antropogénico. Las fuentes naturales de material particulado son aquellas que sin intervención humana emiten partículas a la atmósfera. Opuestamente, las fuentes antrópicas son aquellas actividades humanas que emiten partículas a la atmósfera. Unas y otras pueden emitir partículas primarias o los compuestos precursores que generen partículas secundarias. Fuentes naturales de partículas primarias son las emisiones fugitivas de los suelos, las re-suspensiones de polvos de los desiertos, el aerosol marino, las aguas saladas de mares y océanos, incendios forestales, fuentes biogénicas y las emanaciones volcánicas [2]. Más del 80% de las partículas presentes en la atmósfera tienen un origen natural. En cuanto al origen antropogénico, las fuentes emisoras de partículas son diversas; se pueden citar como las más importantes, la combustión, procesos industriales, tales como cementeras, minería, siderúrgicas, tratamiento de residuos urbanos, etc [3]. Las partículas presentes en el aire pueden tener una composición muy diversa, dentro de ella se encuentran los metales. Los metales en las partículas se pueden encontrar en forma atómica o iónica (sales y óxidos); entre los más abundantes se hallan el Ca y el Al, provenientes de procesos de erosión de la corteza terrestre y de algunos procesos industriales [4]. Otros metales abundantes son el Na, presente en los aerosoles marinos, el K procedentes de procesos de erosión, el Fe originado principalmente en procesos siderúrgicos [5]. El Pb, liberado por las pinturas y por el uso como antidetonante en las gasolinas. Metales como As, Cr, Cu, Mn y Zn están relacionados con emisiones directas provenientes de la minería [6]. En Colombia la extracción del carbón a gran escala se inició en la década de 1980. Actualmente la mayor operación la adelanta Carbones del Cerrejón Limited, ubicada en Barrancas al norte de Colombia. El área minera se extiende a lo largo de 50 kilómetros en el valle del río Ranchería, cubriendo una extensión de 69.364 hectáreas [7]. Dada la magnitud de la acción minera se realizó un estudio para determinar los niveles de metales en la fracción respirable de partículas PM₁₀, para así evaluar la acción antrópica sobre la química de la atmósfera de esta zona de Colombia.

II. MARCO TEORICO

La contaminación atmosférica se define como la impurificación de la atmósfera por inyección o permanencia temporal en ella de materias gaseosas, líquidas o sólidas ajenas a su composición natural o en proporción superior a aquella (8). Los contaminantes atmosféricos son fenómenos físicos, o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana. Cuantitativamente las partículas, caracterizadas como contaminantes atmosféricos primarios, constituyen más del 90% del problema de la contaminación en la atmósfera (9). Las partículas son emitidas al aire como resultado de actividades humanas, o de causas naturales [10]. Durante los últimos años, el material particulado atmosférico (mpa) ha suscitado un gran interés debido a su impacto en la salud humana [11], en los ecosistemas y en el cambio climático [12].

El material particulado (PM, por sus siglas en inglés), en la atmósfera forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen [13]. También se emplean otros términos, para denominarlo, tales como polvo atmosférico y aerosol [14]. Las partículas pueden ser

originadas por fenómenos naturales o por diversas actividades humanas [15]. Desde el punto de vista natural, las partículas se pueden originar por procesos como la polinización de las plantas, procesos geológicos e incendios forestales [16]; en cuanto al origen antropogénico se puede incluir desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas [17]. Generalmente todas las emisiones industriales emiten partículas atmosféricas, incluyéndose, además, otras actividades antropogénicas como la manipulación y el transporte de materias primas en fábricas [18]. El tamaño de las partículas es un parámetro decisivo que condiciona el tiempo de residencia de éstas en la atmósfera. En función del tamaño, las partículas se clasifican en dos tipos: partículas en suspensión y sedimentables [19].

Las partículas PM₁₀ hacen parte del grupo de las que se encuentran en suspensión en la atmósfera, en gran medida variables en tiempo y espacio [20]; y se definen como todas aquellas partículas que son recolectadas con un 50% de eficiencia mediante un muestreador de alto volumen cuyo diámetro o punto de corte es de 10 µm [21]. El material particulado de la atmósfera tiene un papel importante en los ciclos biogeoquímicos tanto del suelo, como del agua [22]; incluso adquieren mayor importancia, cuando en su composición hay presencia en altas concentraciones de elementos metálicos tóxicos, que juegan un papel biológico negativo al producir daños ambientales [23].

En cuanto a la composición química las partículas atmosféricas están formadas por compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y metales [24]. La constitución metálica incluye diferentes elementos, unos livianos como el Al, Si, K, Ca, y otros pesados como Fe, Zn, V, Ti, Cd, Pb, Hg y Sb además compuestos orgánicos de elevada toxicidad y potencial efecto cancerígeno y mutagénico [25]. Las principales fuentes de metales presentes en las partículas atmosféricas incluyen la industria, la minería, la fundición de metales y las fuentes móviles [26]. Muchos estudios han indicado que varios componentes de las partículas atmosféricas se han asociado con efectos adversos, como es el caso de los metales [27]. A nivel biológico, los metales pueden inducir un efecto de estimulación de factores proinflamatorios, citotoxicidad a través de mecanismos de estrés oxidativo, actividad generadora de radicales libres de oxígeno, daño oxidativo del ADN, y mutagenicidad [28].

III. METODOLOGÍA

a. Área de estudio y ubicación de sitios de muestreo.

Barrancas es una localidad ubicada en la región de La Guajira, al norte de Colombia de coordenadas 10°57'21"N 72°47'31", su área de extensión de 742 km², con una altitud 40 msnm y una temperatura media de 28 °C [29]. Para el monitoreo de las partículas PM₁₀, se tuvo en cuenta el protocolo y seguimiento de la calidad del aire de Colombia [30]. Se definieron tres puntos localizados, teniendo en cuenta su ubicación en las zonas de influencia de las actividades mineras de extracción de carbón a cielo abierto, las actividades agrícolas y las pecuarias: El punto 1 = Barrancas, el punto 2 = Papayal y el punto 3 = Los Magueyes (Figura 1). El monitoreo tuvo una frecuencia mensual, comprendido entre marzo y diciembre del año 2017.

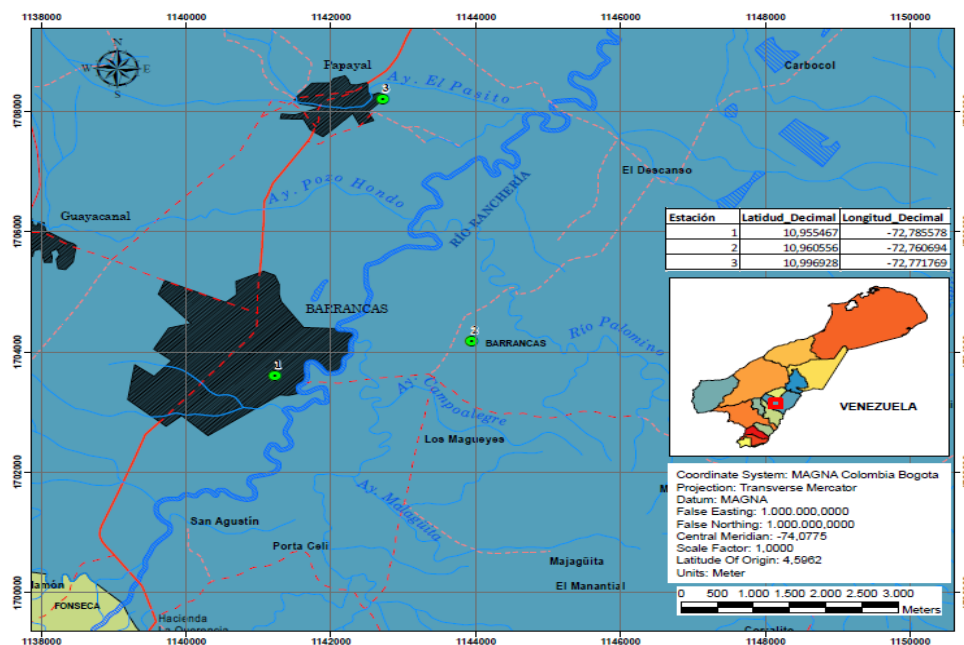


Figura 1. Ubicación de sitios de muestreo de partículas PM₁₀ en Barrancas, La Guajira. Año 2017.
 Fuente: Elaboración propia.

Las muestras de partículas PM₁₀ fueron recolectadas en filtros de cuarzo de 23,3 x 25,4 cm, por medio de tres muestreadores de alto volumen PM₁₀ (Hi-Vol VFC) (Figura 2), para un total de 30 muestras. Los filtros de cuarzo utilizados se caracterizan por tener un pH alcalino (mayor a 7,5) y una eficiencia de colección del 99% de partículas >0,3 micrómetros de diámetro. Los filtros fueron previamente preparados 24 horas antes de su pesaje, a una temperatura de 25 °C y una humedad relativa del 45 %. El tiempo de muestreo fue 24 horas continuas con flujo entre 1,10 y 1,34 m³/min.

b. Análisis químico de filtros.

Previamente antes del análisis de los metales, los filtros fueron sometidos a una digestión ácida. Se coloca un 1/4 de filtro en un vaso de precipitado que contiene 40 mL de una solución de agua regia (65

mL de HNO₃ + 182 mL de HCl, a un volumen total de 500 mL) y 3 mL de HClO₄ por un tiempo de 24 horas. Posterior a la digestión ácida, el contenido del vaso de precipitado, se somete a calentamiento por un tiempo de una hora, a una temperatura entre 60 y 80°C hasta lograr obtener un pequeño extracto. El extracto obtenido se diluye con aproximadamente 20 mL de agua desionizada recién hervida, se agita y se filtra al vacío (filtro Whatman de fibra de vidrio 0,45 µm, 0,47mmØ). El filtrado final se afora a 250 mL, y finalmente se refrigera a 4°C, hasta su posterior análisis [31]. La determinación de los metales (Al, Cr, V, Fe, As, Se,) se realizó mediante la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) [32], por medio de un ICP-MS Agilent Technologies 7000 series; el cual fue operado con Argón 5,0 como gas de arrastre a 0,9 L/min, una bomba de nebulización a 0,4 rps, un tiempo de retención de 0,3 s. y la utilización de una solución patrón multielemental.

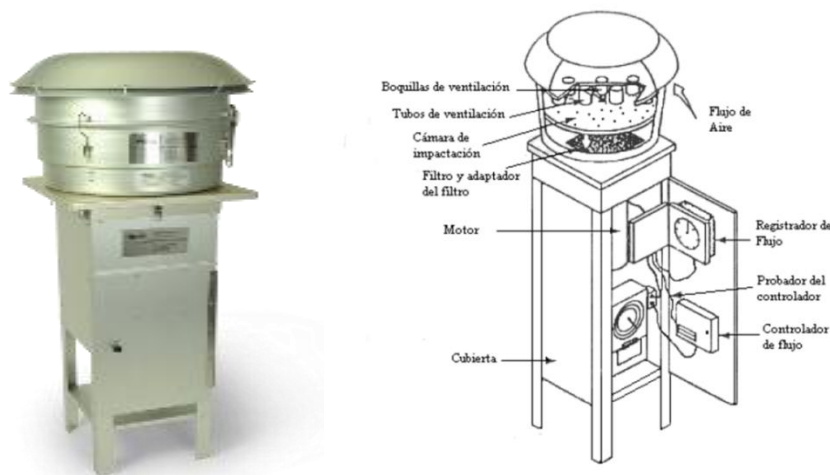


Figura 2. Muestreador de partículas PM₁₀ Hi-Vol.
 Fuente: REDAIRE 2013.

c. Análisis estadístico.

Los análisis fueron realizados por triplicado. Por medio del programa estadístico PASW Statistics Versión 21 IBM en Windows 10 se realizó el procesamiento de los datos. Se pudo corroborar estadísticamente la existencia de diferencias en cada uno de los iones a través de una prueba de análisis de varianzas y comparaciones múltiples con la prueba de diferencia significativa honesta (HSD, por sus siglas en inglés) de Tukey, con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0,05$). La existencia de posibles asociaciones entre los diferentes metales y sus respectivas concentraciones, fueron determinadas por medio de un análisis de correlación. Las posibles asociaciones de los diferentes metales teniendo en cuenta los sitios de monitoreo, fueron determinadas a través de un análisis de componentes principales, por medio del procedimiento de rotación Varimax.

El control de calidad de los análisis implicó la aplicación de pruebas de trazabilidad correspondientes a determinación de la linealidad, precisión, exactitud, límite de detección y de cuantificación, sobre blancos de filtros de laboratorio. Para la determinación de la exactitud del método analítico, se realizaron dos pruebas: una para verificar la ausencia de interferencias en el procedimiento analítico de determinación (% recuperación) y otra para tener una primera aproximación de la eficiencia del proceso de extracción por medio de un material de referencia certificado (Material de Referencia Certificado de iones y metales en suelo marca ERA Lote

D039540). Para el cálculo de la incertidumbre, se tomaron en cuenta tres parámetros estadísticos para el cálculo respectivo: Varianza, Desviación típica (o estándar) y el Coeficiente de varianza. La información estadística se muestra en la Tabla 1.

IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

La concentración media anual de partículas PM₁₀ de $33,4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 5,88$ (Tabla 2), supera el límite máximo permitido de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ definido por la OMS [33], pero se encuentra por debajo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según lo establecido por la normativa colombiana [34]. Los niveles y composición metálica de las partículas atmosféricas PM₁₀ generadas en la zona de estudio están influenciados por la geología local, la re-suspensión del suelo, el tráfico vehicular y las operaciones mineras de carbón. Se consideran además otras fuentes adicionales incluyentes en la concentración de las PM₁₀ en la zona, como lo son la topografía del terreno, las condiciones meteorológicas y el aerosol marino impulsado por las corrientes de aire. Con respecto a la composición metálica, las PM₁₀ están constituidas mayoritariamente de Al ($1,17 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 0,14$) y Fe ($0,53 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 0,30$) (Tabla 2). De manera general las concentraciones de los sitios de muestreo presentan poca variación (Figura 3) y no se observaron diferencias significativas durante el tiempo de estudio ($p > 0,05$).

Tabla 1. Valores de las características de desempeño del método analítico, para la determinación de los metales en las PM₁₀

Metal	R	Desviación Estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Coeficiente de variación (%)	% de recuperación	LOD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	LOQ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Al	0,998	0,04	0,5	98,7	0,0002	0,0008
Cr	0,998	0,05	0,9	102,9	0,095	0,12
V	0,999	0,06	0,4	102,6	0,0056	0,0087
Fe	0,998	0,03	1,5	102,8	0,094	0,12
Se	0,999	0,07	1,4	99,3	0,0018	0,0043
As	0,999	0,03	2,0	100,0	0,094	0,11

Fuente: Elaboración propia.

Las correlaciones significativas positivas entre Cr y V ($p=0,01$ $r=0,663$), Cr y As ($p=0,01$ $r=0,918$), Cr y Fe ($p=0,05$ $r=0,387$), V y Fe ($p=0,05$ $r=0,383$), V y As ($p=0,01$ $r=0,671$) (Tabla 3); indican

que de manera natural el Al, Cr, Fe, V y As pueden derivarse de la re-suspensión del suelo y/o de las actividades mineras.

Tabla 2. Concentraciones de partículas PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y de su contenido metálico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la atmósfera de Barrancas, La Guajira, Colombia. Año 2017.

	Barrancas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Papayal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Los Magüeyes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Concentración PM ₁₀	$33,6 \pm 4,26$	$33,4 \pm 5,24$	$33,2 \pm 8,14$	$33,4 \pm 5,88$
Al	$1,42 \pm 0,16$	$0,88 \pm 0,12$	$1,23 \pm 0,14$	$1,17 \pm 0,14$
Cr	$0,56 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,10$	$0,48 \pm 0,20$	$0,47 \pm 0,11$
V	$0,29 \pm 0,07$	$0,48 \pm 0,12$	$0,40 \pm 0,18$	$0,39 \pm 0,12$
Fe	$0,65 \pm 0,32$	$0,44 \pm 0,19$	$0,50 \pm 0,41$	$0,53 \pm 0,30$
Se	$0,079 \pm 0,009$	$0,093 \pm 0,012$	$0,079 \pm 0,011$	$0,083 \pm 0,010$
As	$0,023 \pm 0,009$	$0,013 \pm 0,020$	$0,016 \pm 0,015$	$0,017 \pm 0,014$

Fuente: Elaboración propia.

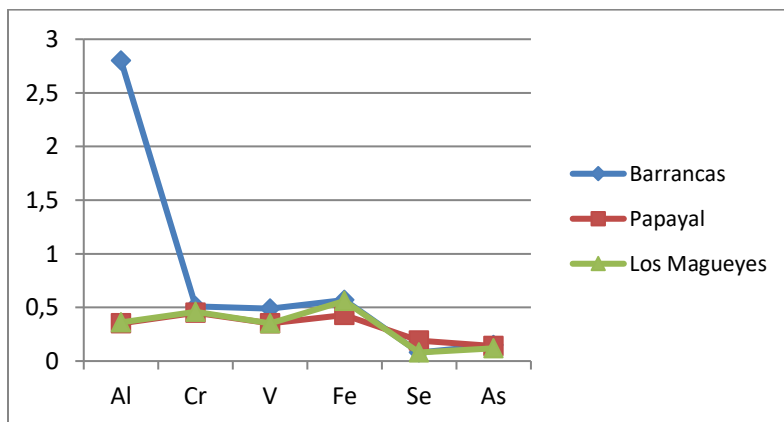


Figura 3. Variación de las concentraciones promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de metales en las PM₁₀, en los sitios de muestreo de Barrancas, La Guajira, Colombia. Año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la variación temporal de las concentraciones metálicas en las PM₁₀, se pudo observar que los niveles de Al, Cr, Fe, V, Se y As; son mayores durante los meses de mayo y junio, que corresponde a la época de sequía, con respecto al comportamiento en los meses de octubre y noviembre, o sea la época de lluvias (Figura 4). Factores como la re-suspensión de partículas al suelo y el transporte de aerosoles marinos influenciados por los vientos de mayor

intensidad, con predominancia en la dirección noreste, se consideran como los responsables del aumento en las concentraciones de los metales durante la época de sequía. Por su parte, la disminución de las concentraciones durante la época de invierno, debe ser consecuencia de la ocurrencia del lavado de las partículas solubles, disminuyéndose su concentración atmosférica total [35].

Tabla 3. Matriz de correlaciones entre los metales de las partículas atmosféricas PM₁₀ en la atmósfera de Barrancas. La Guajira. Colombia.

		Al	Cr	V	Fe	Se	As
Al	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N	1	0,103 0,588 30	0,009 0,961 30	-0,091 0,632 30	-0,005 0,979 30	0,048 0,800 30
Cr	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N		1	0,663** 0,000 30	0,387* 0,035 30	0,075 0,693 30	0,918** 0,000 30
V	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N			1	0,383* 0,036 30	0,119 0,531 30	0,671** 0,000 30
Fe	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N				1	0,110 0,564 30	0,184 0,331 30
Se	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N					1	0,099 0,603 30
As	Correlación de Pearson Sig. (bilateral) N						1 30

Fuente: Elaboración propia.

**. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

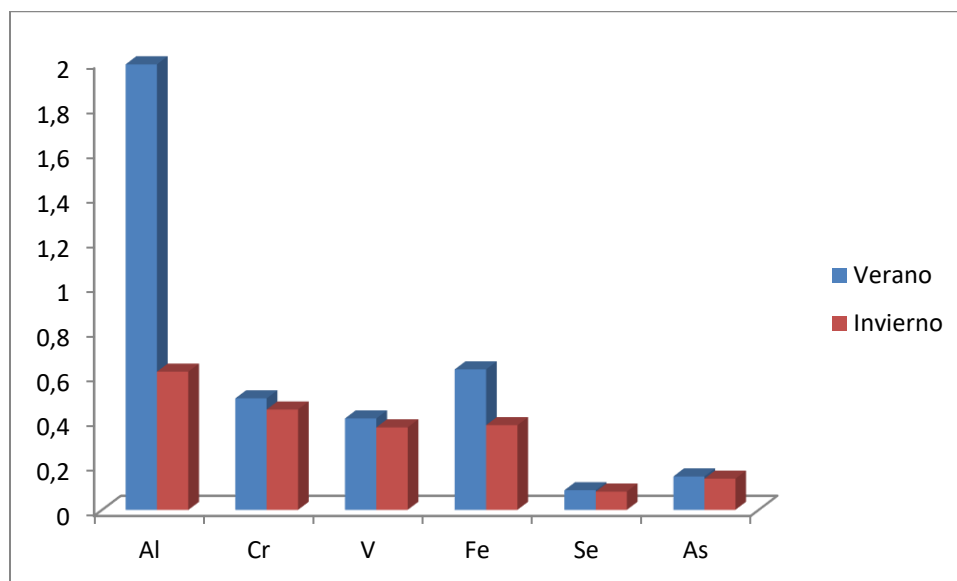


Figura 4. Variación de las concentraciones (µg/m³) de metales en las PM₁₀ en los sitios de muestreo de Barrancas, durante los períodos de verano e invierno. Año 2017.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el análisis de componentes principales, a partir de la matriz de correlación para encontrar los factores (F), que explican la variabilidad de los resultados obtenidos en el estudio. La Figura 5 es una representación gráfica de las asociaciones entre los metales para los dos primeros componentes principales. En dicha figura se indica que en el factor 1 se presenta una asociación entre los metales Se, Fe, V y Cr, que estadísticamente corresponden a variables dependientes; lo que permite indicar que estas especies provienen de la misma fuente natural como la re-suspensión del suelo o antropogénica como las actividades mineras. Cerca de un 75 a 90% de metales como cobre, cadmio, níquel, zinc y plomo se encuentran en la fracción de PM₁₀; y sus principales fuentes de emisión incluyen la industria, la minería, la fundición de metales y las fuentes móviles [36]. Algunos metales han

sido identificados con diversas fuentes: el Al, Si, Ti y Ca son típicamente materiales del suelo y la corteza terrestre; el Pb, Cu y Fe están relacionados con emisiones vehiculares [37]. La mayor contribución de emisiones de metales traza de origen antrópico, se asocia a fuentes estacionarias o móviles que producen gases y partículas generalmente por combustión de material fósil. Estas fuentes pueden ser estacionarias o puntuales: chimeneas industriales, plantas termoeléctricas, incineradores municipales, explotación de minas operaciones metalúrgicas, plantas de cemento, industria petrolera y petroquímicas, y móviles: transporte automotor (vehículos, trenes, aviones, etc) [38].

Ciertos metales se consideran como indicadores de fuentes antrópicas de partículas atmosféricas. Para el caso de los procesos de

combustión del carbón y/o la re-suspensión del suelo, por su composición aluminosilicada, se utiliza el Al como elemento indicador de partículas procedentes de dichas fuentes. Partículas que contienen Se, se relacionan también con la combustión del carbón, mayoritariamente que las producidas por la re-suspensión del suelo [39]. Para el caso de fuentes como la combustión de crudos de petróleo y gasoil en la composición química de partículas aerotransportadas, se utiliza el V como indicador. De igual manera el V, también se considera como indicador de partículas del suelo que son transportadas desde zonas árido-desérticas [40]. Metales como el Al, Fe, Zn, Cu y Pb, son atribuidos a partículas cuya fuente es el petróleo crudo [41].

Al hacer comparación del contenido de metales en las partículas PM₁₀, presentes en la atmósfera de Barrancas, con otras zonas de Colombia y de América, se observa que según los reportes de la ciudad

de Riohacha (Colombia)[42] y zonas de alto tráfico vehicular del estado Zulia en Venezuela [43], las concentraciones de Cr son muy superiores, aproximadamente en unas 100 veces. A sí mismo el contenido de As también se encuentran muy por encima de lo registrado en la ciudad de Riohacha [42], pero muy por debajo con respecto a Fonseca (Colombia) [44]. Para el caso de los niveles de concentración del Fe, el comportamiento no es el mismo, pues se encuentra muy por debajo de los registrados para la zona industrial de Puente Aranda de Bogotá [45], Pamplona [46], Riohacha [42] en Colombia y de Potosí en México [47]. De manera general, se observa que las concentraciones de los metales en las PM₁₀ de la atmósfera de Barrancas, se encuentran dentro del rango promedio con respecto a los reportes de la zona minera de carbón en La Guajira de Colombia [48] (Tabla 4).

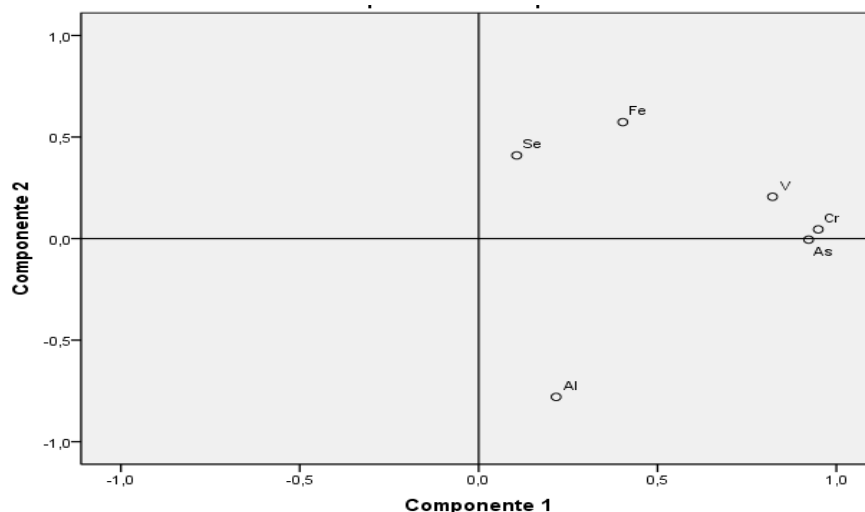


Figura 5. Análisis de componentes principales para 6 metales presentes en las PM₁₀ de la atmósfera de Barrancas, La Guajira, Colombia
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Comparación de las concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de algunos metales en partículas PM₁₀ de la atmósfera de Barrancas con otras zonas de Colombia y de América

Lugar	Cr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fe ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	As ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Barrancas. Este estudio	0,47	0,53	0,017
Fonseca [44]	0,40	0,32	0,12
Riohacha (Colombia) [42]	0,0048	0,36	0,001
Bogotá (Colombia) [45]	0,25	2,12	*
Pamplona (Colombia) [46]	0,88	22,97	*
Zona minera de carbón de La Guajira (Colombia) [48]	0,47	0,42	0,15
Potosi (México) [47]	*	6,79	0,26
Estado Zulia (Venezuela) [43]	0,05	*	*

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la normativa colombiana [29] y los recomendados por la OMS [28], se puede observar que la concentración de V no supera los límites permisibles, pero el As se encuentra un poco por encima de lo permitido por la OMS (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación legislativa de las concentraciones de algunos metales pesados en partículas PM₁₀ de la atmósfera de Barrancas, La Guajira.

Referencia	V ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	As ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Límite. Colombia (anual)	1,0	*
Límite permisible (OMS)	*	0,01
Barrancas	0,39	0,017

Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

Los niveles de PM₁₀ reportados en este estudio en la localidad de Barrancas en Colombia, superaron el estándar anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la OMS para proteger la salud pública con un buen margen de seguridad. Los metales de mayor concentración conciernen a Al ($1,17 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 0,14$) y Fe ($0,53 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 0,30$). Las concentraciones de metales presentes en las partículas PM₁₀ se ven afectadas por las condiciones climatológicas, de forma tal que los niveles más altos se presentan en la época de sequía, cuando la velocidad de los vientos aumenta la re-suspensión del suelo, y los más bajos en la época de lluvias. Con base en lo establecido en la norma nacional de Colombia, los niveles de V presentes en el material particulado se encuentran por debajo del límite establecido; sin embargo, se observa un posible riesgo potencial para la salud por parte del As, debido a que su valor promedio sobrepasa el estándar establecido por la OMS. Los metales evaluados en las partículas pueden ser emitidos a la atmósfera producto de las actividades mineras, relacionadas con las excavaciones (Fe, Se, As) y la circulación vehicular (V, Cr).

VI. REFERENCIAS

- [1] J. Cortez. "Evaluación de la contaminación atmosférica en el aire ambiente de Manizales por COPs y PM₁₀", Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales, 2013.
- [2] L. Negral. "Variabilidad de niveles y composición del material particulado en suspensión en el sudeste de la Península Ibérica", Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2010.

- [3] C. Lin, S. Chen, K. Huang. "Characteristics of metals in nano/ultrafine/fine/coarse particles collected beside a heavily trafficked road. *Environmental Science & Technology*, vol. 39, no. 21, pp. 8113–8122, 2005.
- [4] S. Cakmak, R. Dales, L. Kauri, M. Mahmuda, K. Van Ryswyk, J. Vanos, L. Liu, P. Kumarathasan, E. Thomson, R. Vincent, S. Weichenthal. "Metal composition of fine particulate air pollution and acute changes in cardiorespiratory physiology". *Environmental Pollution*, vol 189, pp. 208-214, 2014.
- [5] M. Xu, Y. Wang, Y. Tang, L. Zhang, X. Tang, X. Li. "Study on characteristics of water-soluble ions in PM₁₀ in autumn in Nanjing. *Environ. Eng.* vol 30, no 5, pp. 108–113, 2012.
- [6] W. Birmili, A. Allen, F. Bary, R. Harrison. "Trace metal concentrations and water solubility in size-fractionated atmospheric particles and influence of road traffic". *Environmental Science & Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 1144–1153, 2006.
- [7] R. Gualdrón. "Cerrejón. Hacia la rehabilitación de las tierras intervenidas para la minería a cielo abierto". Ed. Panamericana Formas e Impresos S.A. Bogotá, 2010.
- [8] C. Orozco, A. Pérez, M. González, F. Rodríguez, J. Alfayate. "Contaminación Ambiental. Una visión desde la química". Ed. Thomson Editores Spain. Madrid, 2003.
- [9] L. Suárez, D. Álvarez, Y. Bendeziú, J. Pomalaya. "Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú", *Revista de la Sociedad de Química de Perú*, vol. 83, no. 2, 2017.
- [10] J. Aldabe, D. Elustondo, C. Santamaría, E. Lasheras, M. Pandolfi, A. Alastuey, J. Santamaría. "Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ at rural, urban and traffic sites in Navarra (North of Spain)". *Atmospheric Research*, vol. 102, no. 1–2, pp. 191–205, 2011.
- [11] P. Pant, Harrison R. "Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter Concentrations from field measurements: A review". *Atmospheric Environment*, vol. 77, pp. 78-97, 2013.
- [12] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *The Scientific Basis*. IPCC. Cambridge University Press, 2001.
- [13] D. Voutsas, C. Samara, E. Manoli, D. Lazarou, P. Tzoumaka. "Ionic composition of PM_{2.5} at urban sites of northern Greece: secondary inorganic aerosol formation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* vol 21, no 7, pp. 4995–5006, 2014.
- [14] K. Balakrishnan, S. Ghosh, B. Ganguli, S. Sambandam, N. Bruce, D. Barnes, et al. "State and national household concentrations of PM_{2.5} from solid cook fuel use: results from measurements and modeling in India for estimation of the global burden of disease". *Environmental Health*, vol. 12, no. 77, 2013.
- [15] J. Pachón. "Estudio exploratorio de la concentración de sustancias peligrosas en partículas respirables de cuatro municipios de Cundinamarca", Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2004.
- [16] A. Sánchez de la Campa, J. De la Rosa, Y. González, R. Fernández, A. Alastuey, X. Querol, A. Stein, J. Ramos, L. Rodríguez, S. García, I. Orellana, S. Navas. "Levels and chemical composition of PM in a city near a large Cu-smelter in Spain". *Journal of Environmental Monitoring*, vol 13, pp. 1276–1287, 2011.
- [17] C. Orozco, A. Pérez, M. González, F. Rodríguez, J. Alfayate. "Contaminación Ambiental, Una visión desde la química", Thomson Editores. 1ª Ed, Madrid, 2005.
- [18] S. Castillo, J. De la Rosa, A. Sánchez de la Campa, Y. González, R. Fernández. "Heavy metal deposition fluxes affecting an Atlantic coastal area in the southwest of Spain. *Atmospheric Environment*, vol 77, pp. 509-517, 2013.
- [19] O. Solana. "Evolución horaria de la composición elemental del material particulado en Elche". Facultad de ciencias experimentales, Departamento de física y arquitectura de computadores área de física aplicada, Universidad Miguel Hernández, España, 2014.
- [20] Y. González. "Caracterización físico-química del material particulado atmosférico de origen industrial en Andalucía. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva. España, 2011.
- [21] J. Herrera, S. Rodríguez. "Validación de un método de análisis para la determinación de metales pesados en partículas PM₁₀ colectadas en aire ambiente", *Tecnología en Marcha*, vol. 23, no. 3, 2010.
- [22] M. Nasiruddin, A. Sarwar. "Chemical composition of wet precipitation of air pollutants: A case study in Karachi, Pakistan". *Atmósfera*, vol. 27, no 1, pp. 35-46, 2014.
- [23] E. Velali, E. Papachristou, A. Pantazaki, T. Choli-Papadopoulos, S. Planou, A. Kouras, E. Manoli, A. Besis, D. Voutsas, C. Samara. "Redox activity and in vitro bioactivity of the water-soluble fraction of urban particulate matter in relation to particle size and chemical composition". *Environmental Pollution*, vol 10, pp. 1-13, 2015.
- [24] M. Minguillón, M. Cirach, G. Hoek, B. Brunekreef, M. Tsai, K. de Hoogh, A. Jedynska, I. Kooter, M. Nieuwenhuijsen, X. Querol. "Spatial variability of trace elements and sources for improved exposure assessment in Barcelona". *Atmospheric Environment*. Vol. 89, pp. 268 – 281, 2014.
- [25] C. González, B. Aristizábal. "Acid rain and particulate matter dynamics in a mid-sized Andean city: The effect of rain intensity on ion scavenging". *Atmospheric Environment*, vol. 60, pp. 164-171, 2012.
- [26] A. Henao, J. Cortés, C. González, B. Aristizábal. "Concentración de PM₁₀ en el aire ambiente de Manizales y la influencia de las variables meteorológicas, in Concentración de PM₁₀ en el aire ambiente de Manizales y la influencia de las variables meteorológicas". *Encuentro Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química y de Procesos*. ENEIQ, Bogotá, Colombia, 2012.
- [27] C. Samara. "Size distribution of total and water-soluble fractions of particle-bound elements assessment of possible risks via inhalation". *Environ. Sci. Pollut. Res.* vol 22, no. 17, pp. 13412-13426, 2015.
- [28] S. Michael, M. Montag, W. Dott. "Pro-inflammatory effects and oxidative stress in lung macrophages and epithelial cells induced by ambient particulate matter". *Environmental. Pollution*, vol 183, pp. 19–29, 2013.
- [29] Corpoguajira-Corporación Autónoma Regional de La Guajira. *Atlas Ambiental del Departamento de La Guajira*. Riohacha, 2012.
- [30] MAVDT- Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. "Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire", Bogotá, Colombia, 2008.
- [31] C. Doria. "Estudio sobre la composición química de la lluvia y partículas suspendidas en un sitio del área de influencia de las actividades de explotación del carbón mineral en La Guajira Colombiana". Tesis de maestría. Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia, Maracaibo, 2002.
- [32] APHA-American Public Health Association, American Water Works Association Water Pollution Control Federation. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22ed. New York. p541, 2012.
- [33] OMS –Organización Mundial de la salud. "Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre". Actualización mundial. p25, 2005.
- [34] MAVDT-Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 610 "Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006" la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional, Bogotá, 2006.
- [35] J. Galloway, G. Likans, W. Keene, J. Miller. "The composition in remote areas of the world". *Journal Geophysic*, vol. 87, pp. 8771-8786, 1982.
- [36] S. Utsunomiya, K. Jensen, G. Keeler, R. Ewing. "Direct identification of trace metals in fine and ultrafine particles in the

- Detroit urban atmosphere". *Environmental Science & Technology*, vol. 38, pp. 2289–2297, 2004.
- [37] M. Grazia, V. Vaccano, R. Granluigi. "Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter in the ambient air of Milan (Italy)". *Atmospheric Environment*, vol 35, 2001.
- [38] J. Putaud "European aerosol phenomenology - 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe". *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 10, pp. 1308-1320, 2010.
- [39] U. Tomza. "Trace elements in the atmospheric aerosol and Katowice, Poland". Technical report Instituut voor Nucleaire Wetenschappen, Rijksuniversiteit Gent", Bélgica, 1984.
- [40] P. Cornille, W. Maenhaut, J. Pacyna. "Sources and Characteristics of the atmospheric aerosol near Damascus". *Syria. Atmospheric and Environment*, vol. 24A, pp. 1083-1093, 1990.
- [41] Sadiq M., Mian A. "Nikel and Vanadium in air particulates at Dharahn (Saudi Arabia) during and after the Kuwait Oil Fires". *Atmospheric and Environment*, vol. 28, pp. 2249-2253, 1994.
- [42] R. Rojano, H. Arregocés, G. Restrepo. "Composición Elemental y Fuentes de Origen de Partículas Respirables (PM₁₀) y Partículas Suspendidas Totales (PST) en el Área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia". *Información Tecnológica*, vol. 25, no 6, pp. 3-12, 2014. doi: 10.4067/S0718-07642014000600002.
- [43] A. Machado, N. García, C. García, L. Acosta, Córdova A., Linares M., Giraldoth D., Velásquez H. "Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular". *Int. Contam. Ambient*, vol. 24, no. 4, 2008.
- [44] C. Doria. "Caracterización metálica de material particulado PM₁₀ en la atmósfera de Fonseca, La Guajira, Colombia". *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 2, pp. 79-90, 2017.
- [45] L. Pérez, L. Hernández. "Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá", Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, 2006.
- [46] A. Quijano, M. Quijano, J. Henao. "Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona Norte de Santander –Colombia". *Bistua, Revista de la Facultad de ciencias básicas de la universidad de Pamplona*, vol. 8, no. 1, 2010.
- [47] A. Aragón, A. Campos, R. Layva, M. Hernández, N. Miranda, K. Luszczewski. "Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de Potosí, México". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México, vol. 22, no. 001, pp. 0188-4999, 2006.
- [48] C. Doria, J. Fagundo. "Niveles de metales en partículas atmosféricas en la zona minera de carbón, norte de Colombia". *ITECKNE*, vol 14, no 2, pp. 110-121, 2017.